

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 836 022 A1

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

15.04.1998 Patentblatt 1998/16

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: F16C 39/06

(21) Anmeldenummer: 96810668.2

(22) Anmeldetag: 07.10.1996

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT BE CH DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC  
NL PT SE

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL LT LV SI

(71) Anmelder:

• Sulzer Electronics AG  
8409 Winterthur (CH)

• LUST ANTRIEBSTECHNIK GmbH

35633 Lahnau-Waldgirmes (DE)

(72) Erfinder: Schöb, Reto, Dr.

8604 Volketswil (CH)

(74) Vertreter: Heubeck, Bernhard

Sulzer Management AG,

KS Patente/0007,

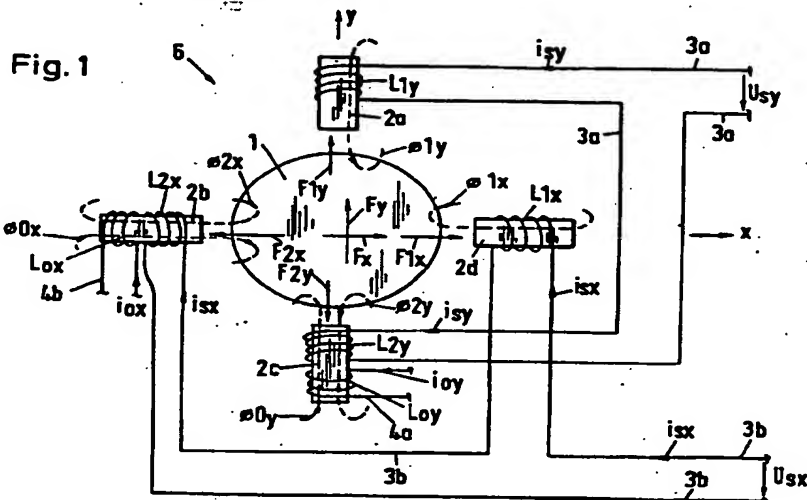
Zürcherstrasse 12

8401 Winterthur (CH)

(54) Magnetische Lagervorrichtung sowie Vorrichtung und Verfahren zum Betrieb derselben

(57) Die magnetische Lagervorrichtung (6) umfasst einen Stator (6a) mit Spulenkernen (2a,2c;2b,2d) zum berührungsfreien Lagern einer Welle (1) in einer x-Richtung und einer senkrecht zu dieser verlaufenden y-Richtung, wobei zumindest zwei in x-Richtung oder y-Richtung beabstandete angeordnete Spulenkern (2a,2c;2b,2d) je eine Wicklung (L1y,L2y;L1x,L2x) aufweisen, welche derart in Serie oder parallel geschaltet sind, dass mit jedem dieser Spulenkernen (2a,2c;2b,2d)

ein im Betrag etwa gleicher magnetischer Fluss ( $\phi_{1y}, \phi_{2y}$ ) erzeugbar ist, und wobei an zumindest einem Spulenkern (2a,2c;2b,2d) eine Vormagnetisierungswicklung (Loy;Lox) angeordnet ist, derart, dass ein zum magnetischen Fluss ( $\phi_{1y}, \phi_{2y}$ ) entgegengesetzt verlaufender, konstanter, eine Vormagnetisierung bewirkender magnetischer Fluss ( $\phi_{0y}, \phi_{0x}$ ) erzeugbar ist.



## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine magnetische Lagervorrichtung gemäss dem Oberbegriff von Anspruch 1. Die Erfindung betrifft weiter eine Vorrichtung zum Betrieb der magnetischen Lagervorrichtung gemäss dem Oberbegriff von Anspruch 4. Die Erfindung betrifft weiter ein Verfahren zum Betrieb der magnetischen Lagervorrichtung gemäss dem Oberbegriff von Anspruch 7.

Aus der EP 0 473 723 A1 ist eine magnetische Lagervorrichtung zur berührungslosen Lagerung einer rotierbaren Welle bekannt. Diese Lagervorrichtung weist den Nachteil auf, dass zur Ansteuerung jeder elektromagnetischen Spule ein bipolar arbeitender Leistungsverstärker beziehungsweise ein bipolarer, als H-Brücke geschalteter Stromsteller erforderlich ist. Ein derartiger, als H-Brücke geschalteter Stromsteller weist vier ansteuerbare Schalter auf und ist daher relativ teuer, sodass eine aufwendige und entsprechend teure Ansteuer- und Regelvorrichtung erforderlich ist, um diese bekannte magnetische Lagervorrichtung zu betreiben.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine wirtschaftlich vorteilhaftere Lagervorrichtung sowie eine wirtschaftlich vorteilhaftere Vorrichtung sowie ein entsprechendes Verfahren zum Betrieb der Lagervorrichtung vorzuschlagen.

Diese Aufgabe wird gelöst durch eine magnetische Lagervorrichtung mit den Merkmalen von Anspruch 1. Die Unteransprüche 2 bis 3 beziehen sich auf weitere, vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung. Die Aufgabe wird weiter gelöst mit einer Vorrichtung zum Betrieb der Lagervorrichtung gemäss den Merkmalen von Anspruch 4. Die Unteransprüche 5 und 6 betreffen weitere, vorteilhafte Ausgestaltungen der Vorrichtung. Die Aufgabe wird weiter gelöst mit einem Verfahren zum Betrieb der magnetischen Lagervorrichtung gemäss den Merkmalen von Anspruch 7. Die Unteransprüche 7 und 8 beziehen sich auf weitere, vorteilhafte Verfahrensschritte.

Die Aufgabe wird insbesondere gelöst durch eine magnetische Lagervorrichtung umfassend einen Stator zum berührungsfreien Lagern eines ferromagnetischen Körpers, insbesondere einer rotierbaren Welle, wobei der Stator insbesondere gegenüberliegend angeordnete Spulenkern mit je eine Wicklung aufweisen, welche in Serie oder parallel geschaltet sind, und wobei an einem dieser Spulenkern eine weitere, eine Vormagnetisierung bewirkende Wicklung angeordnet ist. Diese Anordnung weist den Vorteil auf, dass durch diese Wicklung eine Vormagnetisierung in einer Spule der Lagervorrichtung erzeugbar ist, und dass deshalb die gegenüberliegend angeordneten Spulenkern mit einem unipolaren Strom ansteuerbar sind, um eine ansteuerbare und regelbare magnetische Lagerkraft auf die Welle zu bewirken. Ein Vorteil der Erfindung ist darin zu sehen, dass somit zur Ansteuerung der Welle in x-Richtung oder in y-Richtung, das heisst pro räumlichem Freiheitsgrad, je ein einziger unipolarer Steller

beziehungsweise eine unipolare Stellvorrichtung aufweisend einen einzigen Schalter erforderlich ist. Ein Vorteil der Erfindung ist darin zu sehen, dass eine derartig ausgestaltete magnetische Lagervorrichtung mit einer unipolar arbeitenden Stellvorrichtung betreibbar ist, welche Stellvorrichtung üblicherweise einen einzigen ansteuerbaren Schalter bedarf, weshalb die Stellvorrichtung sehr kostengünstig ausführbar ist.

Die Erfindung wird an Hand mehrerer Ausführungsbeispiele beschrieben. Es zeigen:

- Fig. 1 eine Seitenansicht einer magnetischen Lagervorrichtung zur Lagerung einer Welle in x- und y-Richtung;
- Fig. 2 eine Seitenansicht einer weiteren, magnetischen Lagervorrichtung zur Lagerung einer Welle in y-Richtung;
- Fig. 3 ein Beispiel einer Veränderung des Steuerstrom  $i_{sy}$  in Funktion der Zeit, wobei in den Fig. 3a bis 3e folgende Detailspekte dargestellt sind:
  - Fig. 3a der Steuerstrom  $i_{sy}$  beziehungsweise der magnetische Fluss  $\phi_{1y}$  in Funktion der Zeit;
  - Fig. 3b der magnetische Fluss  $\phi_{2y}$  in Funktion der Zeit;
  - Fig. 3c die nach oben auf den Rotor bewirkte Kraft  $F_{1y}$  in Funktion der Zeit;
  - Fig. 3d die nach unten auf den Rotor bewirkte Kraft  $F_{2y}$  in Funktion der Zeit;
  - Fig. 3e die Summe der in vertikaler Richtung y auf den Rotor bewirkten Kräfte  $F_y$  in Funktion der Zeit;
- Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel einer elektronischen Stellvorrichtung;
- Fig. 4a eine unipolare Stellvorrichtung beziehungsweise ein unipolarer Stromsteller als Halbbrücke geschaltet;
- Fig. 5a eine magnetische Lagervorrichtung zur magnetischen Lagerung einer Welle bezüglich fünf Freiheitsgrade;

Fig. 5b eine elektronische Stellvorrichtung für die Lagervorrichtung gemäss Fig. 5a;

Fig. 5c ein weiteres Ausführungsbeispiel einer elektronischen Stellvorrichtung für die Lagervorrichtung gemäss Fig. 5a;

Fig. 6a,6c,6d eine Seitenansicht weiterer Ausführungsbeispiele magnetischer Lagervorrichtungen;

Fig. 6b eine Längsansicht des Ausführungsbeispieles gemäss Fig. 6a;

Fig. 7a,7b,7c,7d eine Seiten- und Längsansicht weiterer Ausführungsbeispiele einer magnetischen Lagervorrichtung;

Fig. 8 einen Längsschnitt durch eine in axialer Richtung wirkende magnetische Lagervorrichtung;

Fig. 9 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer elektronischen Stellvorrichtung.

Fig. 1 zeigt eine Seitenansicht einer magnetischen Lagervorrichtung 6, welche nebst weiteren, nicht dargestellten Komponenten, zwei Paare gegenüberliegend angeordneter Spulenkern 2a,2c;2b,2d mit Wicklungen L1y,L2y,Loy;L1x,L2x,Lox umfasst. Die magnetische Lagervorrichtung 6 dient dazu die Lage der rotierbaren Welle 1 durch magnetisch wirkende Kräfte derart in x-Richtung und y-Richtung zu beeinflussen, dass die Welle 1 berührungsfrei in der Lagervorrichtung 6 gehalten ist. Die Lage der Welle 1 wird in x-Richtung und y-Richtung von einem Sensor erfasst, und dieses Signal einer Ansteuer- und Regelvorrichtung zugeführt, welche eine unipolare Stellvorrichtung 5 derart ansteuert, dass durch die erzeugte Steuerspannung  $U_{sy}, U_{sx}$  beziehungsweise durch den erzeugten Steuerstrom  $i_{sy}, i_{sx}$  in den Spulenkernen 2a,2c;2b,2d derartig starke Magnetfelder erzeugt werden, dass der Rotor 1 berührungslos schwebend zwischen den Spulenkernen 2a,2c;2b,2d gehalten wird. Die gegenüberliegend angeordneten Spulenkern 2a,2c weisen gleichsinnig verlaufend gewickelte Wicklungen L1y,L2y auf, welche über einen elektrischen Leiter 3a in Serie geschaltet sind, sodass die Wicklungen L1y,L2y von einem gemeinsamen Steuerstrom  $i_{sy}$  durchflossen sind, beziehungsweise über den beiden Wicklungen L1y,L2y eine Steuerspannung  $U_{sy}$  anliegt. Am Spulenkern 2c ist eine zusätzliche, zur Wicklung L2y gegensinnig verlaufend gewickelte Vormagnetisierungswicklung Loy angeordnet, welche von einem Gleichstrom  $i_{oy}$  durchflossen ist um eine zu der durch die Wicklung L2y bewirkten

magnetischen Durchflutung  $\phi_{2y}$  entgegengesetzt wirkende magnetische Durchflutung  $\phi_{oy}$  zu erzeugen. Die durch die Wicklung L2y und die Vormagnetisierungswicklung Loy bewirkten magnetischen Durchflutungen  $\phi_{2y}, \phi_{oy}$  müssen immer gegensinnig verlaufend sein. Die Vormagnetisierungswicklung Loy kann auch zur Wicklung L2y gleichsinnig verlaufend gewickelt sein, wobei in diesem Falle die beiden Wicklungen L2y und Loy von in entgegengesetzter Richtung fliessenden Strömen durchflossen sind.

Im Spulenkern 2a ist ein magnetischer Fluss  $\phi_{1y}$  erzeugbar und im Spulenkern 2c ein bezüglich dem Fluss  $\phi_{1y}$  in gleicher Richtung verlaufender magnetischer Fluss  $\phi_{2y}$ . Dem magnetischen Fluss  $\phi_{2y}$  ist der in entgegengesetzter Richtung verlaufende Vormagnetisierungsfluss  $\phi_{oy}$  überlagert. Die Summe der in den Spulenkernen 2a,2c fliessenden magnetischen Flüsse bewirken die magnetischen Kräfte F1y, F2y auf die Welle 1. In x-Richtung sind ebenfalls gegenüberliegende Spulenkern 2b,2d angeordnet, welche gleichsinnig verlaufend gewickelte Wicklungen L1x,L2x aufweisen sowie eine am Spulenkern 2b angeordnete Vormagnetisierungswicklung Lox, sodass magnetische Flüsse  $\phi_{1x}, \phi_{2x}, \phi_{ox}$  erzeugbar sind, welche entsprechende, in x-Richtung auf die Welle 1 wirkende Kräfte F1x, F2x erzeugen.

Fig. 4 zeigt ein elektrisches Schaltbild mit einer unipolaren Stellvorrichtung 5 zur Ansteuerung der in Serie geschalteten Wicklungen L1y,L2y mit einer Steuerspannung  $U_s$ . Der dargestellte unipolare Stromsteller 5c weist nur einen einzigen Schalter 5b auf, welcher von einer nicht dargestellten Regelvorrichtung mit einer Pulsweitenmodulation PWM angesteuert wird. Die magnetische Lagervorrichtung 6 gemäss Fig. 1 wird derart betrieben, dass die zusätzliche Speisespannung  $U_{s1}$  gleich der Hälfte der Zwischenkreisspannung  $U_z$  beträgt. Die Zwischenkreisspannung  $U_z$  ist eine den unipolaren Stromsteller 5c versorgende Gleichspannung.

Fig. 4a zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines unipolaren Stromstellers 5c, welcher zwei Schalter S1,S2 sowie zwei Freilaufdioden D1,D2 aufweist und als eine Halbbrücke ausgestaltet ist. Die beiden Wicklungen L1y,L2y sind in Serie geschaltet und von einem gemeinsamen Strom durchflossen.

Fig. 3 zeigt die Auswirkung einer zeitlichen Veränderung des durch die Wicklungen L1y,L2y fliessenden Stromes  $i_{sy}$  auf den magnetischen Fluss  $\phi_{1y}, \phi_{2y}$  sowie die daraus resultierenden Kräfte F1y,F2y und deren Summenkraft  $F_y$ . Im Diagramm gemäss Fig. 3a wird der Strom  $i_{sy}$ , ausgehend von einem konstant verlaufenden Ausgangswert  $i_{sy0}$ , in Funktion der Zeit t rampenförmig auf einen Wert Null abgesenkt, was in der Spule 2a einen zum Verlauf des Stromes  $i_{sy}$  ähnlich verlaufenden magnetischen Fluss  $\phi_{1y}$  bewirkt. Der in der Vormagnetisierungswicklung Loy fliessende, konstante Strom  $i_{oy}$  ist gleich gross gewählt wie der Ausgangsstromwert  $i_{sy0}$ . Da die Wicklungen Loy und L2y die gleiche Anzahl

Windungen aufweisen und gegensinnig verlaufend gewickelt sind, werden die beiden durch die Wicklungen Loy und L2y erzeugten magnetischen Flüsse gegenseitig kompensiert, sodass zu Beginn in der Spule 2c ein gesamter magnetischer Fluss  $\phi_{2y}$  von Null anliegt. Da der Strom  $i_{sy}$  in Funktion der Zeit absinkt wird in der Spule 2c ein zunehmend grösser werdender magnetischer Fluss  $\phi_{2y}$  erzeugt, welcher bei einem Strom von  $i_{sy}$  gleich Null am grössten ist. Dabei wird dieser magnetische Fluss  $\phi_{2y}$  durch den durch die Vormagnetisierungswicklung Loy fliessende konstante Vormagnetisierungsstrom  $i_{oy}$  bewirkt. Fig. 3c zeigt die durch den magnetischen Fluss  $\phi_{1y}$  auf den Rotor 1 bewirkte Kraft F1y in Funktion der Zeit. Fig. 3d zeigt die durch den magnetischen Fluss  $\phi_{2y}$  auf den Rotor 1 bewirkte Kraft F2y in Funktion der Zeit. Der zeitliche Verlauf der Differenz dieser beiden Kräfte F1y-F2y, welche die gesamte in y-Richtung auf den Rotor 1 bewirkte Kraft Fy ergibt, ist in Fig. 3e dargestellt. Die Kraft Fy ändert sich linear in Funktion des Steuerstromes  $i_{sy}$ . Ein Vorteil der Anordnung gemäss Fig. 1 ist darin zu sehen, dass der Steuerstrom  $i_{sy}$  gemäss Fig. 3a nur positive Werte, in einem Wertebereich zwischen dem maximalen Wert  $i_{sy0}$  und dem minimalen Wert Null, einnimmt. Daher sind die in Serie geschalteten Wicklungen L1y,L2y von einer unipolaren Stellvorrichtung 5 ansteuerbar. Die unipolare Stellvorrichtung 5 erlaubt, wie in Fig. 3e dargestellt, bezüglich der y-Richtung sowohl eine positive als auch eine negative Kraft Fy zu erzeugen. Über die in Serie geschalteten Wicklungen L1x,L2x ist auf dieselbe Art eine in x-Richtung wirkende, positive oder negative Kraft Fx auf den Rotor 1 erzeugbar. Die Lage der Welle 1 in der Lagervorrichtung 6 ist somit mit je einer unipolaren Stellvorrichtung 5 in x-Richtung und in y-Richtung regelbar.

Anstelle einer Serieschaltung der Wicklungen L1y,L2y;L1x,L2x können diese auch parallel geschaltet sein, sodass an den Wicklungen L1y,L2y oder L1x,L2x die gleiche Spannung  $U_{sy};U_{sx}$  anliegt. Die Vormagnetisierungswicklung Loy;Lox ist vorzugsweise auf einem der gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2a,2c angeordnet. Dadurch wird im Spulenkerne 2c;2b der durch die Wicklung L2y,L2x erzeugte magnetische Fluss  $\phi_{2y};\phi_{2x}$  durch den in der Vormagnetisierungswicklung Loy;Lox erzeugten magnetischen Fluss geschwächt. Die Vormagnetisierungswicklung Loy kann auch auf beiden gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2a,2c verteilt angeordnet sein, wobei der auf dem Spulenkerne 2a angeordnete Teil der Vormagnetisierungswicklung Loy eine kleinere Windungszahl aufweist als der auf dem Spulenkerne 2c angeordnete Teil der Vormagnetisierungswicklung Loy, bei gleichem Vormagnetisierungsstrom. Der auf dem Spulenkerne 2a angeordnete Teil der Vormagnetisierungswicklung Loy weist bei gleicher Stromrichtung denselben Wicklungssinn auf wie L1y. Der auf dem Spulenkerne 2c angeordnete Teil der Vormagnetisierungswicklung weist bei gleicher Stromrichtung den umgekehrten Wick-

lungssinn auf wie die Wicklung L2y.

Die Vormagnetisierungswicklung Loy ist derart ausgestaltet und wird derart mit einem konstanten Strom  $i_{oy}$  gespeist, dass, wie in Fig. 3a und 3b dargestellt, bei einem Strom  $i_{sy0}$  der magnetische Fluss  $\phi_{2y}$  ungefähr Null beträgt. Diese Bedingung kann durch eine entsprechende Anzahl Windungen der Vormagnetisierungswicklung Loy und/oder durch den Betrag des konstanten Stromes  $i_{oy}$  bestimmt werden. Somit ist die Vormagnetisierungswicklung Loy mit einer beliebigen Anzahl Windungen ausführbar, wenn dabei die Grösse des konstanten Stromes  $i_{oy}$  entsprechend angepasst wird. Dasselbe gilt natürlich auch für die Vormagnetisierungswicklung Lox.

Fig. 2 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer magnetischen Lagervorrichtung 6, welche nur in y-Richtung eine berührungslose Lagerung der Welle 1 erlaubt. Die bezüglich der Welle 1 gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2a,2c sind u-förmig ausgestaltet und weisen je eine in Serie geschaltete Wicklung L1y,L2y auf. Am unteren Spulenkerne 2c ist zudem eine Vormagnetisierungswicklung Loy angeordnet, welche von einem konstanten Strom  $i_{oy}$  durchflossen ist.

Fig. 5a zeigt schematisch dargestellt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur steuerbaren magnetischen Lagerung einer Welle 1 bezüglich fünf Freiheitsgrade, mit zwei bezüglich der axialen Richtung der Welle 1 versetzt angeordneten radialen magnetischen Lagervorrichtungen 6. Beide Lagervorrichtungen 6 sind identisch ausgestaltet und weisen gegenüberliegend angeordnete Spulenkerne 2a,2b,2c,2d,2e,2f,2g,2h mit Wicklungen L1x,L2x,L1y,L2y,L3x,L4x,L3y,L4y und Vormagnetisierungswicklungen Lox,Loy,Loox,Looy auf. Zwei zusätzliche Spulenkerne 2i,2k sind in axialer Richtung verlaufend jeweils an der Stirnseite der Welle 1 angeordnet, um die axiale Lage der Welle 1 gesteuert zu beeinflussen. Diese Spulenkerne 2i,2k weisen zwei in Serie geschaltete Wicklungen L1z,L2z auf sowie eine Vormagnetisierungswicklung Loz. Die Spulenkerne 2a,2b,2c,2d,2e,2f,2g,2h sind in Fig. 5a schematisch in stabförmiger Ausführung dargestellt. Vorteilhafterweise werden diese Spulenkerne u-förmig oder E-förmig verlaufend ausgestaltet.

Fig. 5b zeigt ein Ausführungsbeispiel einer elektronischen Stellvorrichtung zum Ansteuern der Wicklungen der magnetischen Lagervorrichtung gemäss Fig. 5a. Die elektronische Schaltung wird von einer Gleichspannung  $U_0$  gespeist, wobei alle Vormagnetisierungsspulen Lox,Loy,Looy,Loox,Loz in Serie geschaltet von einem konstanten Vormagnetisierungsstrom  $i_0$  durchflossen sind. Mit Hilfe eines getakteten Schalters S, sowie mit einer den Strom glättenden Induktivität L und einem Kondensator CK2 wird eine Gleichspannung U1 mit einem Spannungswert erzeugt, der in einer Grössenordnung der Hälfte des Spannungswertes der Speisepannung  $U_0$  liegt. Die jeweils in Serie geschalteten, bezüglich der Lagervorrichtung 6 gegenüberliegend

angeordneten Wicklungspaar  $L_{1y}, L_{2y}; L_{1x}, L_{2x}; L_{3y}, L_{4y}; L_{3x}, L_{4x}; L_{1z}, L_{2z}$  werden je von einem getakteten Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  individuell angesteuert, wobei zwischen dem Wicklungspaar und den Schaltern jeweils eine Freilaufdiode  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  angeordnet ist. Ein Vorteil der elektronischen Schaltung gemäss Fig. 5b ist darin zu sehen, dass pro Freiheitsgrad der Welle 1 nur ein einziger getakteter Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  erforderlich ist, sodass für eine Anordnung gemäss Fig. 5a zur Regelung der Lage der Welle 1 nur fünf getaktete, unipolar arbeitende Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  erforderlich sind. Sofern die Spannungen  $U_1$  und  $U_0$  nicht an sich zur Verfügung stehen ist zudem ein zusätzlicher getakteter Schalter  $S$  erforderlich, um die Spannung  $U_1$  zu erzeugen. Diese Anordnung gemäss Fig. 5b bedarf einer geringen Anzahl und zudem ausschliesslich unipolar arbeitende Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ , sodass diese Anordnung sehr kostengünstig herstellbar ist. Als getaktete Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  sind an sich bekannte elektronische Halbleiterschalt Elemente aufweisend Transistoren, wie z.B. Bipolartransistoren, IGBT, FET, GTO oder andere aus dem Fachgebiet der Leistungselektronik bekannte elektronische Elemente geeignet.

Fig. 5c zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer elektronischen Anordnung zum Ansteuern der Wicklungen der in Fig. 5a dargestellten magnetischen Lagervorrichtung. Die Anordnung wird von zwei gleichen Spannungswerte aufweisenden Gleichspannungsquellen  $U_0/2$  gespeist. An den in Serie geschalteten Vormagnetisierungswicklungen  $L_{ox}, L_{oy}, L_{oox}, L_{ooy}, L_{oz}$  liegt eine Gleichspannung  $U_0$  an, welche einen Gleichstrom  $i_0$  bewirkt. Alle in Serie geschalteten Wicklungspaare  $L_{1y}, L_{2y}; L_{1x}, L_{2x}; L_{3y}, L_{4y}; L_{3x}, L_{4x}; L_{1z}, L_{2z}$  sind mit dem Mittenabgriff 10a verbunden, wobei anschliessend an die Wicklungspaare jeweils die getakteten Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  angeordnet sind. Eine zusätzlich angeordnete, mit dem Mittenabgriff 10a verbundene Induktivität  $L$  ist über das getaktete Schaltelement  $S_6$  ansteuerbar. Diese Anordnung mit Schaltelement  $S_6$  dient als eine Symmetrierchoppvorrichtung, um den Spannungswert  $U_0/2$  des Mittenabgriffes 10a auch bei einer durch die Schalter  $S_2, S_3, S_4, S_5$  verursachten asymmetrischen Belastung ungefähr konstant zu halten. Die getaktet angesteuerten Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  können auch direkt mit dem Mittenabgriff 10a verbunden sein. Dies ist insbesondere vorteilhaft, wenn der Mittenabgriff 10a auf Erdpotential liegt, da in diesem Falle die Ansteuerung der Schalter  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  besonders einfach ist.

Fig. 6a zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer radialen magnetischen Lagervorrichtung 6, die, ansonst identisch zum Ausführungsbeispiel gemäss Fig. 1 ausgestaltet, einen ringförmig verlaufenden Stator 6a mit in radialer Richtung verlaufenden Spulenkerne 2a, 2b, 2c, 2d aufweist. Fig. 6b zeigt eine Längsansicht der magnetischen Lagervorrichtung 6 gemäss Fig. 6a

mit Welle 1, Stator 6a und Wicklungen  $L_{1y}, L_{2y}, L_{1x}, L_{2x}, L_{1z}, L_{2z}$ .

Fig. 6c zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer magnetischen Lagervorrichtung 6 mit einem ringförmig verlaufenden Stator 6a, der zudem acht in Umfangsrichtung gleichmässig beabstandete, in radialer Richtung verlaufende Spulenkerne 2a, 2b, 2c, 2d, 2l, 2m, 2n, 2o aufweist. Die bezüglich der x-Achse gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2a und 2c weisen je eine Wicklung  $L_{1y}, L_{2y}$  auf, welche in Serie geschaltet und von einem gemeinsamen Strom  $i_{sy}$  durchflossen sind. Die Vormagnetisierungswicklung  $L_{oy}$  ist auf dem Spulenkerne 2m angeordnet, wobei der magnetische Flusskreis, ausgehend vom Spulenkerne 2m über den Rotor 1, den Spulenkerne 2c und dem die beiden Spulenkerne 2m, 2c verbindenden Teilabschnitt des Stators 6a geschlossen ist, sodass die Vormagnetisierungswicklung  $L_{oy}$  den bereits in Fig. 1 beschriebenen, kompensierenden Effekt auf die Wicklung  $L_{2y}$  ausübt. Im Stator 6a können Trennstellen 6b angeordnet sein, welche den in Umfangsrichtung verlaufenden magnetischen Fluss behindern, sodass die beiden Spulenkerne 2m, 2c zusammen mit dem diese verbindenden Teilabschnitt des Stators 6a ein Teilmagnet ausbilden, um möglichst den ganzen in der Spule  $L_{oy}$  erzeugte magnetische Fluss  $\Phi$  durch den Spulenkerne 2c zu leiten. Weiter sind die Spulenkerne 2d, 2b mit Wicklungen  $L_{1x}, L_{2x}$  bezüglich der y-Achse gegenüberliegend angeordnet, wobei die Vormagnetisierungswicklung  $L_{ox}$  auf einem separaten Spulenkerne 2n angeordnet ist.

Fig. 6d zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer magnetischen Lagervorrichtung 6 mit einem bezüglich Fig. 6c identisch ausgestalteten Stator 6a. Die Wicklungen sind, im Vergleich zum Ausführungsbeispiel gemäss Fig. 6c, gleichmässiger verteilt angeordnet, um mögliche Streuflüsse, die zum Beispiel in Fig. 6c zwischen dem Spulenkerne 2a und 2o auftreten könnten, zu reduzieren. Die Wicklung  $L_{1y}$  ist verteilt angeordnet und besteht aus den beiden Teilwicklungen  $L_{1ya}$  und  $L_{1yb}$ , welche auf den Spulenkerne 2a und 2o angeordnet sind. Die zweite Wicklung  $L_{2y}$  befindet sich auf den den Spulenkerne 2a, 2o gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2l, 2d, wobei diese Wicklung  $L_{2y}$  ebenfalls aus zwei in Serie geschalteten Teilwicklungen  $L_{2ya}, L_{2yb}$  besteht. Zudem ist auf den Spulenkerne 2l, 2d die Vormagnetisierungswicklung  $L_{oy}$  angeordnet, welche ebenfalls aus zwei in Serie geschalteten Teilwicklungen  $L_{oya}, L_{oyb}$  besteht. Äquivalent zu den in y-Richtung auf den Rotor 1 wirksamen Wicklungen sind die in x-Richtung wirksamen Spulen angeordnet, wobei die Wicklung  $L_{1x}$  aus den beiden in Serie geschalteten Teilwicklungen  $L_{1xa}$  und  $L_{1xb}$  besteht, sowie die Wicklung  $L_{2x}$  aus den beiden in Serie geschalteten Teilwicklungen  $L_{2xa}$  und  $L_{2xb}$  besteht. Die Vormagnetisierungswicklung  $L_{ox}$  besteht aus den zwei in Serie geschalteten Teilwicklungen  $L_{oxa}$  und  $L_{oxb}$ . Das Ausführungsbeispiel gemäss Fig. 6d wird als eine heteropolare Anordnung bezeichnet, da die Welle 1 in Umfangsrichtung einen ständigen

magnetischen Polwechsel, d.h. ein oder zwei Nordpole N, gefolgt von einem oder zwei Südpolen S, gefolgt von einem oder zwei Nordpolen N usw. aufweist.

Fig. 7a zeigt eine Seitenansicht und Fig. 7b eine Längsansicht eines weiteren Ausführungsbeispiels einer magnetischen Lagervorrichtung 6. Diese Lagervorrichtung 6 weist u-förmig ausgestaltete Spulenkerne 2a, 2b, 2c, 2d auf, wobei gegenüberliegend angeordnete Spulenkerne 2a, 2c je eine Wicklung L1y, L2y aufweisen, welche in Serie geschaltet sind, und wobei an einem Spulenkerne 2c eine weitere, eine Vormagnetisierung bewirkende Wicklung Loy angeordnet ist. Diese Anordnung wird als eine homopolare Anordnung bezeichnet, weil, wie aus Fig. 7b ersichtlich, alle Spulenkerne 2a, 2b, 2c, 2d einen magnetischen Nordpol N auf der rechten Seite, und einen magnetischen Südpol S auf der linken Seite aufweisen. In Umfangsrichtung der Welle 1 weisen somit alle Spulenkerne 2a, 2b, 2c, 2d entweder einen Nordpol N oder einen Südpol S auf. Diese Anordnung weist den Vorteil auf, dass die Welle 1 nicht einem ständigen Polwechsel unterliegt, wodurch zum Beispiel magnetisch induzierte Wirbelströme vermeidbar sind.

Fig. 7d zeigt eine Längsansicht eines weiteren Ausführungsbeispiels einer magnetischen Lagervorrichtung 6 mit E-förmig ausgestalteten Spulenkerne 2a, 2b, 2c, 2d, wobei gegenüberliegend angeordnete Spulenkerne 2a, 2c je eine Wicklung L1y, L2y aufweist, welche in Serie geschaltet sind. Zudem ist auf dem einen Spulenkerne 2c eine Vormagnetisierungswicklung Loy angeordnet. Fig. 7c zeigt einen Querschnitt durch die Anordnung gemäss Fig. 7d entlang der Linie B-B. Bezüglich der in x-Richtung wirksamen Wicklungen sind auf den gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2b, 2d ebenfalls Wicklungen L1x, L2x angeordnet, wobei auf dem Spulenkerne 2b zusätzlich eine Vormagnetisierungswicklung Lox angeordnet ist.

Fig. 8 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer in bezuglich der Welle 1 axialen Richtung wirksamen magnetischen Lagervorrichtung 6, welche zwei ringförmig um die Welle 1 verlaufende, u-förmig ausgestaltete Spulenkerne 2k, 2i umfasst. Zwischen den Spulenkerne 2k, 2i ist ein scheibenförmiges Teil 1a der Welle 1 angeordnet. Die gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2k, 2i weisen je eine ebenfalls ringförmig ausgestaltete Wicklung L1z, L2z auf, welche in Serie geschaltet sind und von einem gemeinsamen Strom  $i_0$  durchflossen sind. An einem der Spulenkerne 2k ist eine Vormagnetisierungswicklung Loz angeordnet, welche vom konstanten Vormagnetisierungsstrom  $i_0$  durchflossen ist.

Fig. 9 zeigt eine weitere magnetische Lagervorrichtung 6 mit einer Ansteuerelektronik. Die gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne 2a, 2c sind u-förmig ausgestaltet und weisen je eine in Serie geschaltete Wicklung L1y, L2y auf. An einem Spulenkerne 2c ist eine Vormagnetisierungswicklung Loy angeordnet. Zusätzlich ist am Spulenkerne 2a eine weitere Wicklung L2y angeordnet, welche über eine Freilaufdiode D geschal-

tet mit der Spannungsquelle Uo verbunden ist. Ein Vorteil dieser zusätzlichen Wicklung L3y sowie deren elektrischer Anschluss an die Spannungsquelle Uo ist darin zu sehen, dass keine gesplittete Spannungsquelle zum Betrieb der magnetischen Lagervorrichtung 6 erforderlich ist. Es genügt eine einzige Spannungsquelle Uo, ohne zusätzliche Mittel, wie in Fig. 5b dargestellt, um eine zusätzliche, unterhalb dem Spannungswert Uo liegende Spannung zu erzeugen. Vorteilhafterweise sind die beiden Wicklungen L1y und L3y bifilar gewickelt, um zwischen diesen beiden Wicklungen eine möglichst gute magnetische Koppelung zu bewirken.

## Patentansprüche

1. Magnetische Lagervorrichtung (6), umfassend einen Stator (6a) mit Spulenkerne (2a, 2c; 2b, 2d), zum berührungsfreien Lagern eines ferromagnetischen Körpers (1), insbesondere einer Welle (1), in einer x-Richtung und einer senkrecht zu dieser verlaufenden y-Richtung, dadurch gekennzeichnet dass zumindest zwei in x-Richtung oder y-Richtung beabstandet angeordnete Spulenkerne (2a, 2c; 2b, 2d) je eine Wicklung (L1y, L2y; L1x, L2x) aufweisen, welche derart in Serie oder parallel geschaltet sind, dass mit jedem dieser Spulenkerne (2a, 2c; 2b, 2d) ein im Betrag etwa gleicher magnetischer Fluss ( $\phi_{1y}, \phi_{2y}$ ) erzeugbar ist, und dass an zumindest einem Spulenkerne (2a, 2c; 2b, 2d) eine Vormagnetisierungswicklung (Loy; Lox) angeordnet ist, derart, dass ein zum magnetischen Fluss ( $\phi_{1y}, \phi_{2y}$ ) entgegengesetzt verlaufender, konstanter, eine Vormagnetisierung bewirkender magnetischer Fluss ( $\phi_{0y}, \phi_{0x}$ ) erzeugbar ist.
2. Magnetische Lagervorrichtung (6) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Vormagnetisierungswicklungen (Loy; Lox) derart ausgestaltet sind und einen derartigen Wicklungssinn aufweisen, dass in bezuglich der x-Richtung oder y-Richtung gegenüberliegend angeordneten Spulenkerne (2a, 2c; 2b, 2d) eine asymmetrische Verteilung des magnetischen Flusses ( $\phi_{0y}, \phi_{0x}$ ) erzeugbar ist.
3. Magnetische Lagervorrichtung (6) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Vormagnetisierungswicklung (Loy) aus zwei bezüglich der x-Richtung oder y-Richtung gegenüberliegend angeordneten Teilwicklungen (Loy1, Loy2) besteht, wobei die eine Teilwicklung (Loy1) eine grössere Windungszahl aufweist als die andere Teilwicklung (Loy2).
4. Vorrichtung zur Steuerung einer magnetischen Lagervorrichtung (6), insbesondere nach einem der



Ansprüche 1 bis 3, gekennzeichnet durch eine nur eine Schaltvorrichtung (5b) aufweisende Halbbrücke (5) oder eine unipolare Stellvorrichtung (5), welche mit Wicklungen (L1y,L2y;L1x,L2x) der Lagervorrichtung (6) elektrisch verbindbar ist.

5

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, die Vorrichtung eine Speisespannung (Us1) aufweist, an welche die Wicklungen (L1y,L2y;L1x,L2x) elektrisch verbindbar sind, und welche Speisespannung (Us1) kleiner als eine Zwischenkreisspannung (Uz) ist. 10
6. Vorrichtung nach Anspruch 4 oder 5, gekennzeichnet durch eine Mehrzahl von unabhängig ansteuerbaren Halbbrücken (5) oder unipolaren Stellvorrichtungen (5), wobei jede Halbbrücke (5) oder unipolare Stellvorrichtung (5) zur Ansteuerung eines Paares von Wicklungen (L1y,L2y; L1x,L2x) vorgesehen ist. 15 20
7. Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Lagervorrichtung (6) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die eine Vormagnetisierung bewirkende Wicklung (Loy;Lox) mit einem Vormagnetisierungsstrom (ioy;iox) betrieben wird, dass die unipolare Stellvorrichtung (5) mit einer gleichgerichteten Zwischenkreisspannung (Uz) betrieben wird, und dass an die Wicklungen (L1y,L2y;L1x,L2x) eine unterhalb der Zwischenkreisspannung (Uz) liegende Speisespannung (Us) angelegt wird. 25 30
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Speisespannung (Us1) die Hälfte der Zwischenkreisspannung (Uz) beträgt. 35
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der maximal durch die Wicklungen (L1y,L2y;L1x,L2x) fliessende Strom (isy) gleich gross ist wie der Vormagnetisierungsstrom (ioy;iox). 40

45

50

55

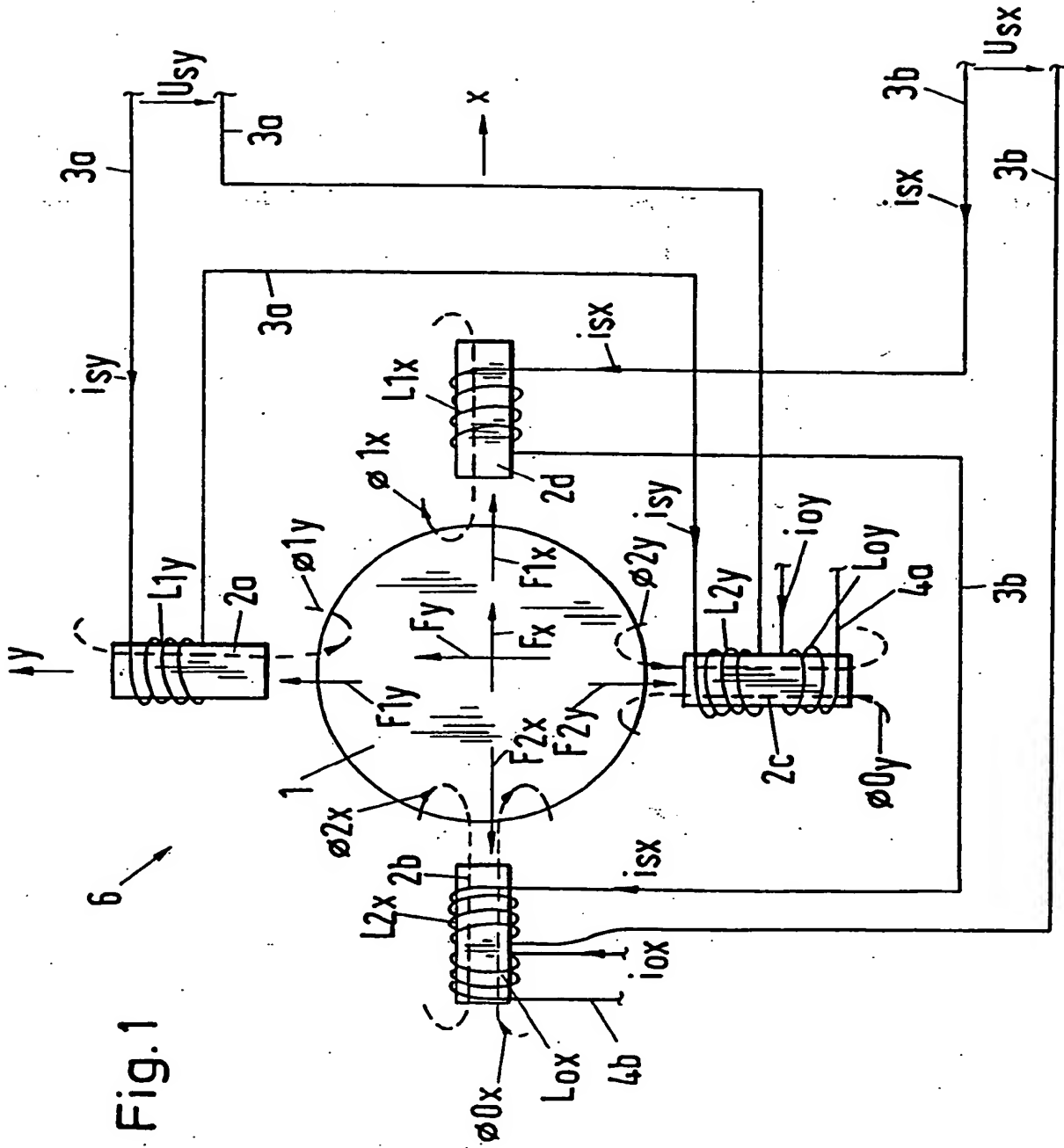


Fig. 1



Fig. 2

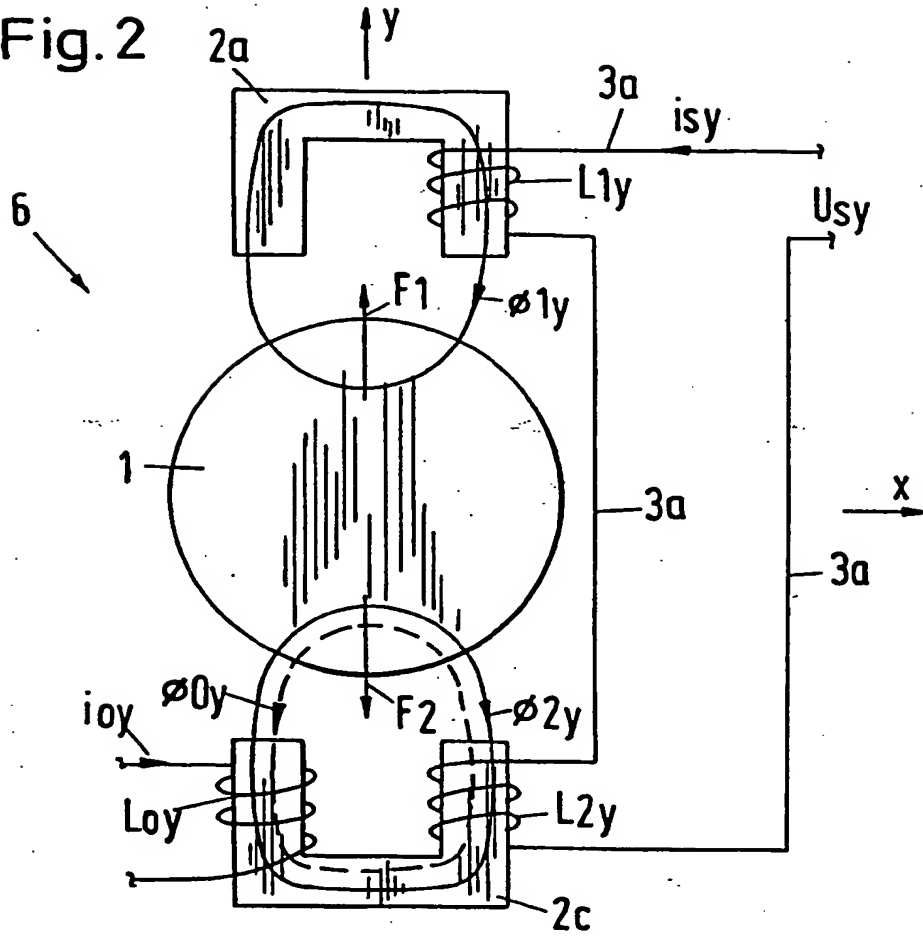


Fig. 4

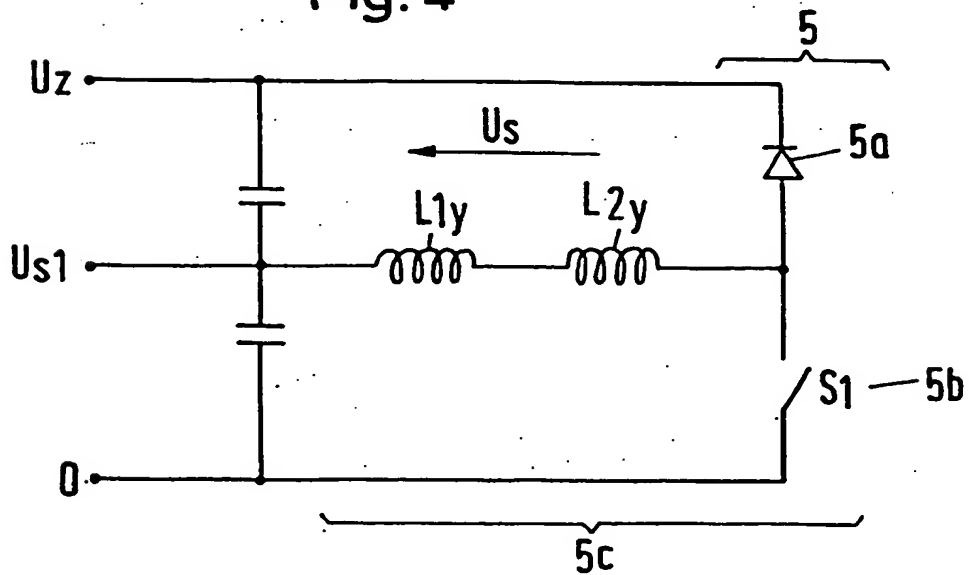


Fig. 3

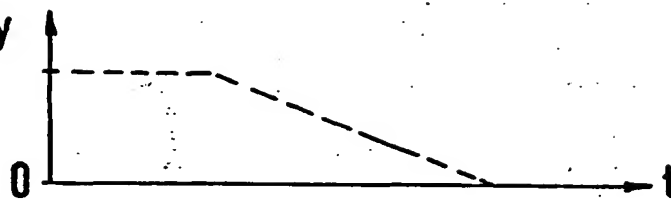
 $i_{sy}, \varnothing 1y$   
 $i_{sy0}$ 


Fig. 3a

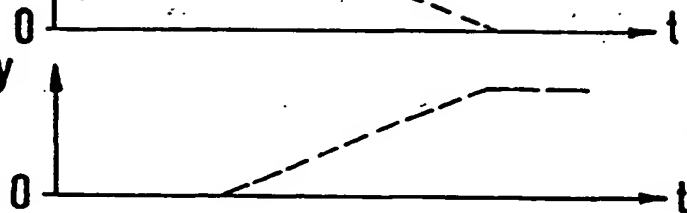
 $i_{oy} - i_{sy}, \varnothing 2y$ 


Fig. 3b

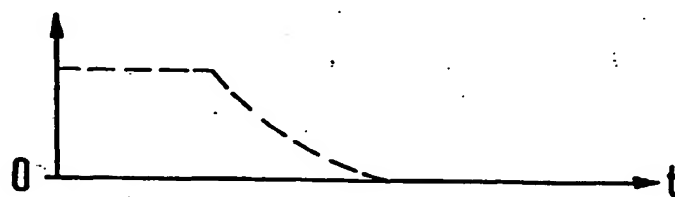
 $F_{1y}$ 


Fig. 3c

 $F_{2y}$ 


Fig. 3d

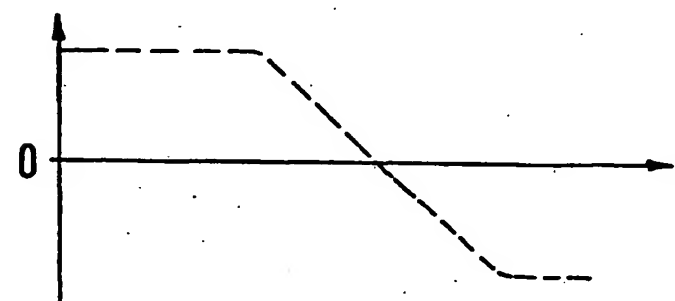
 $F_y = F_{1y} - F_{2y}$ 


Fig. 3e



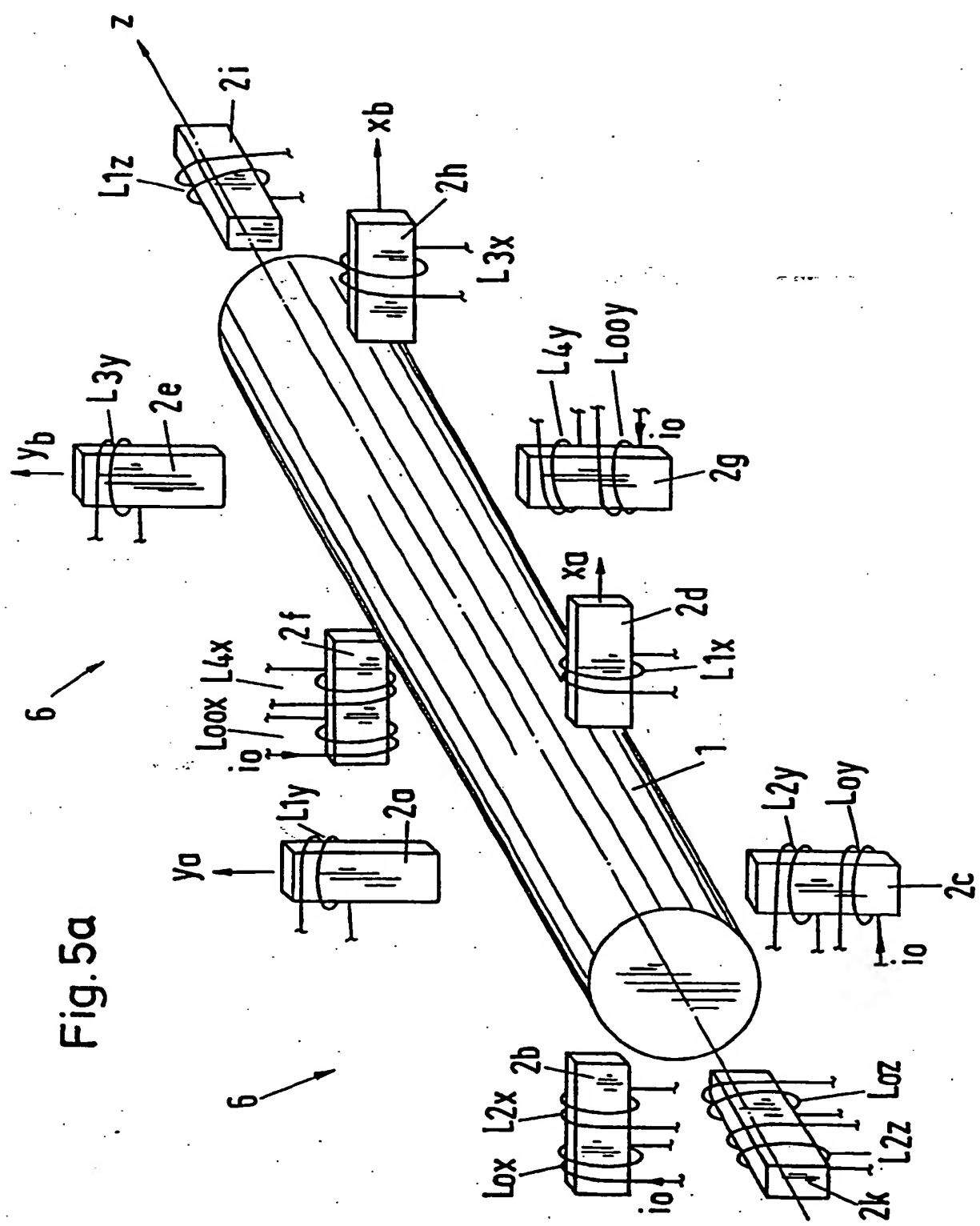
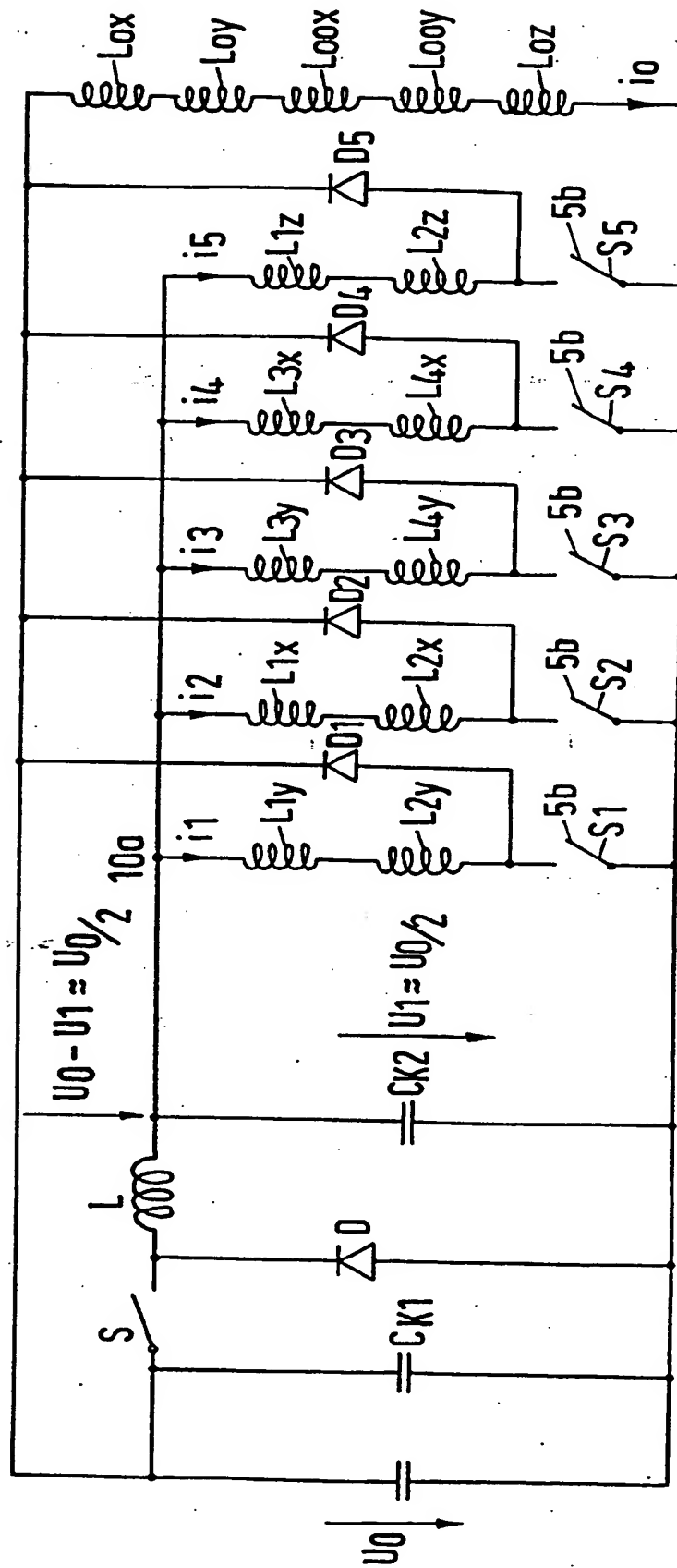
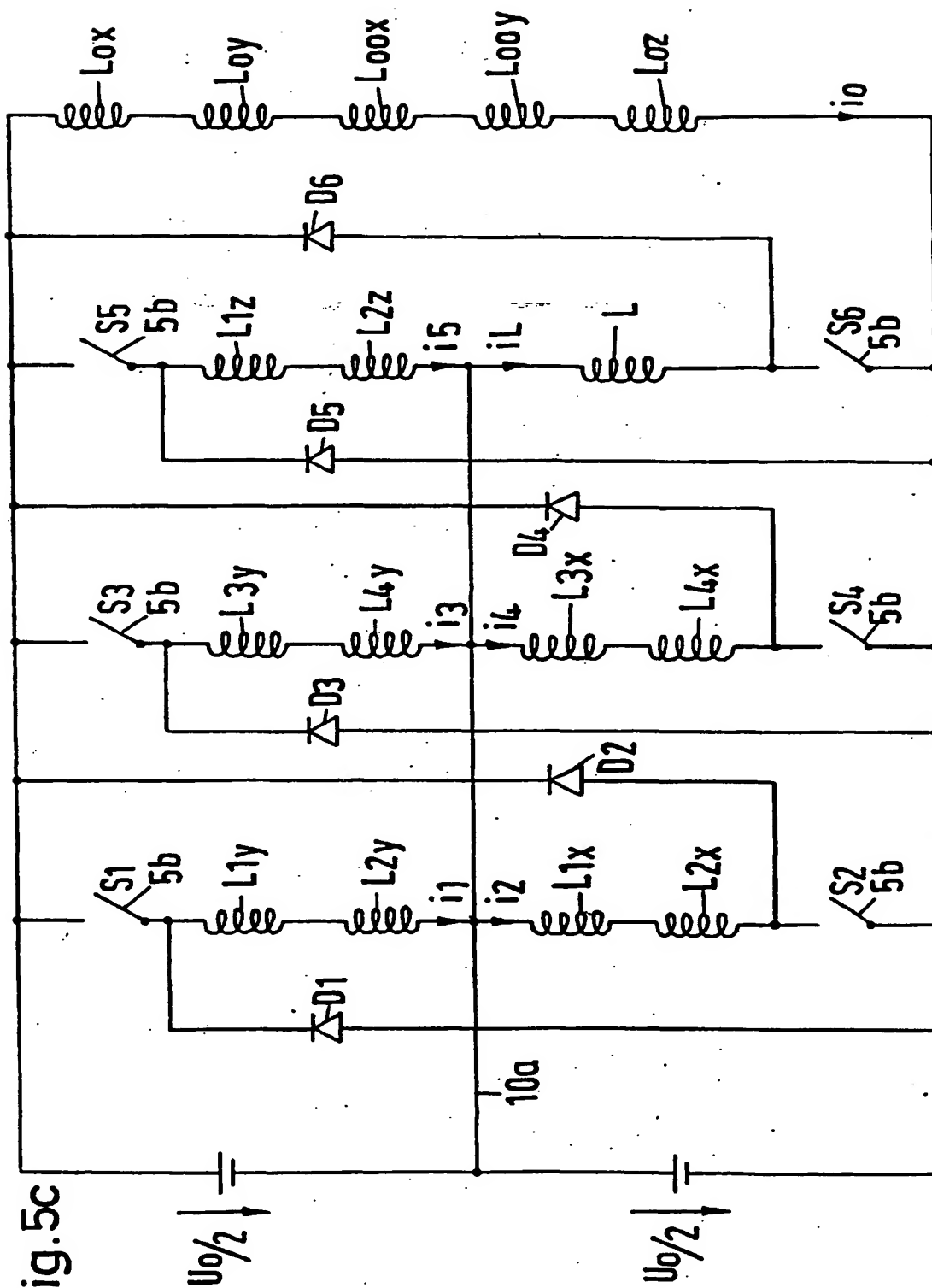
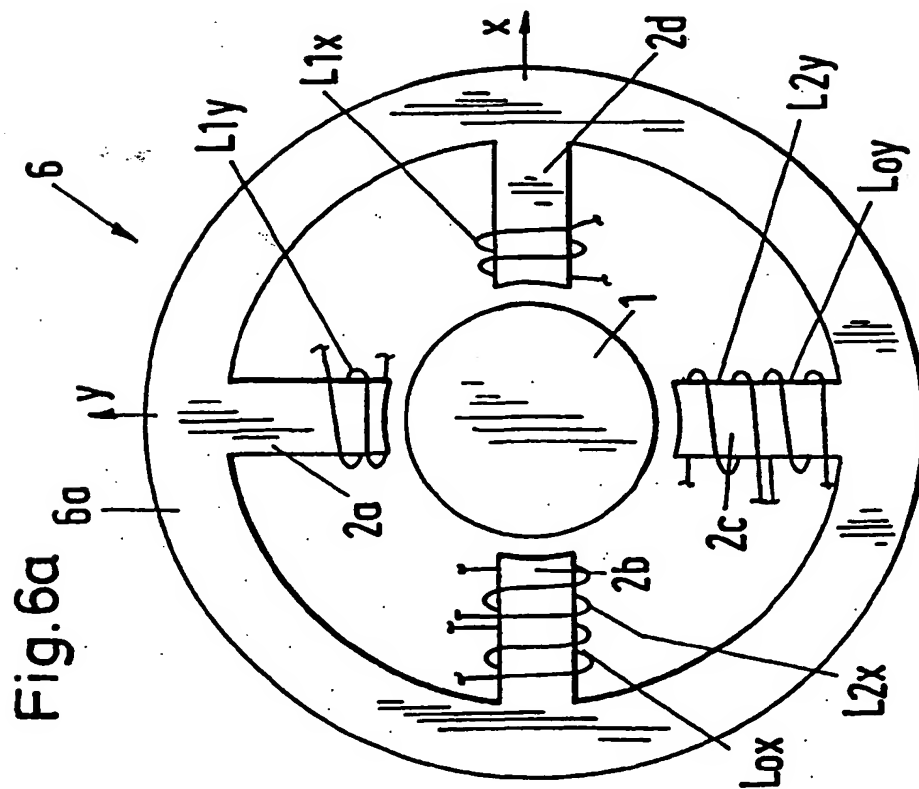
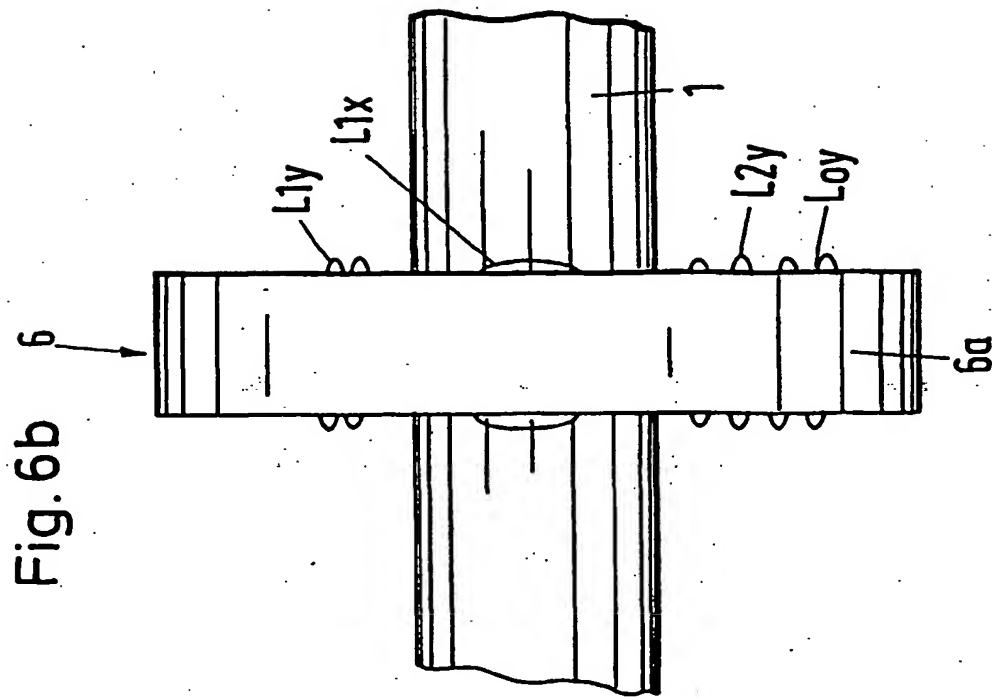


Fig. 5a

Fig. 5b









**Fig. 6c**

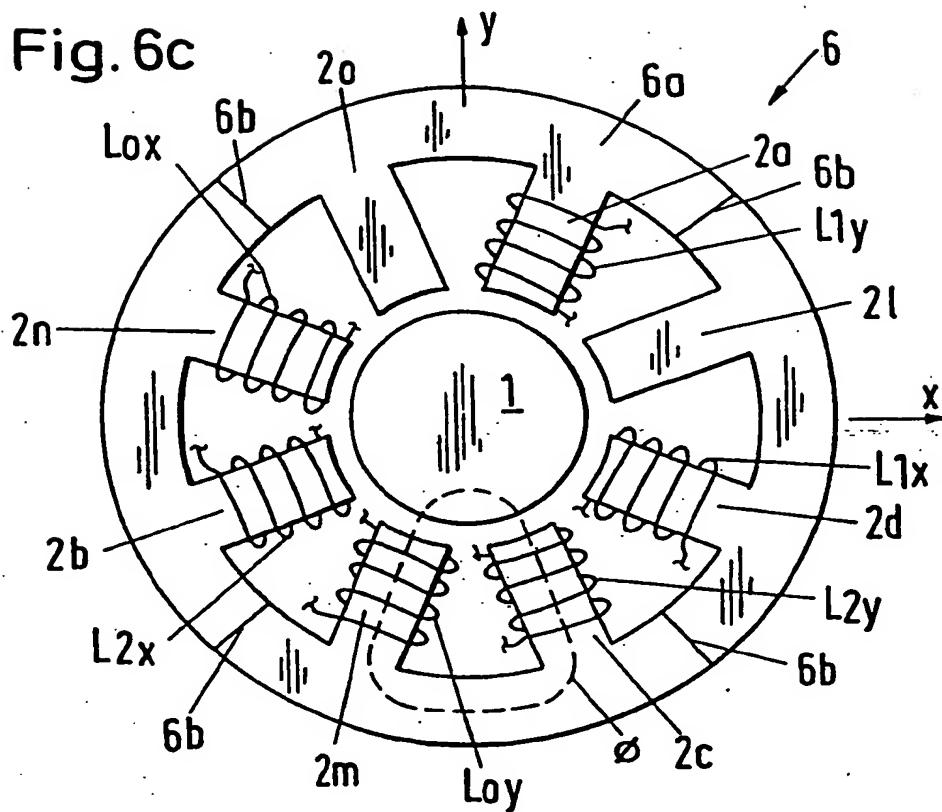


Fig. 6d

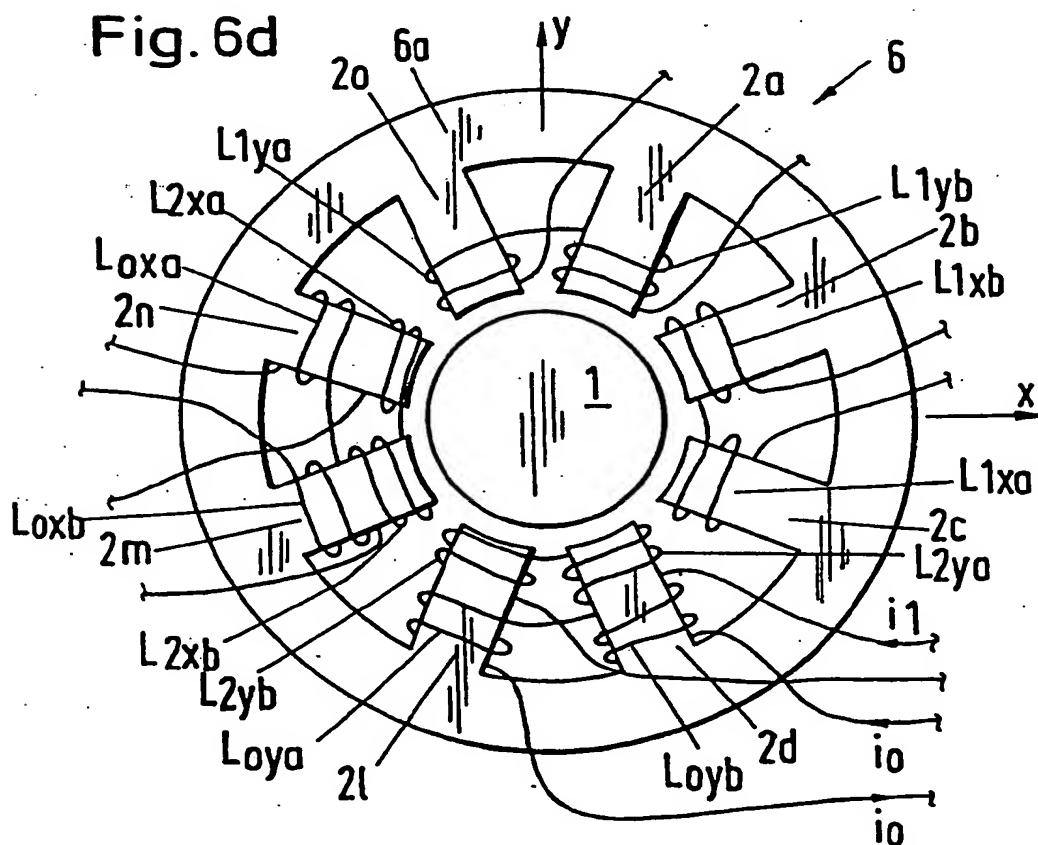


Fig. 7a

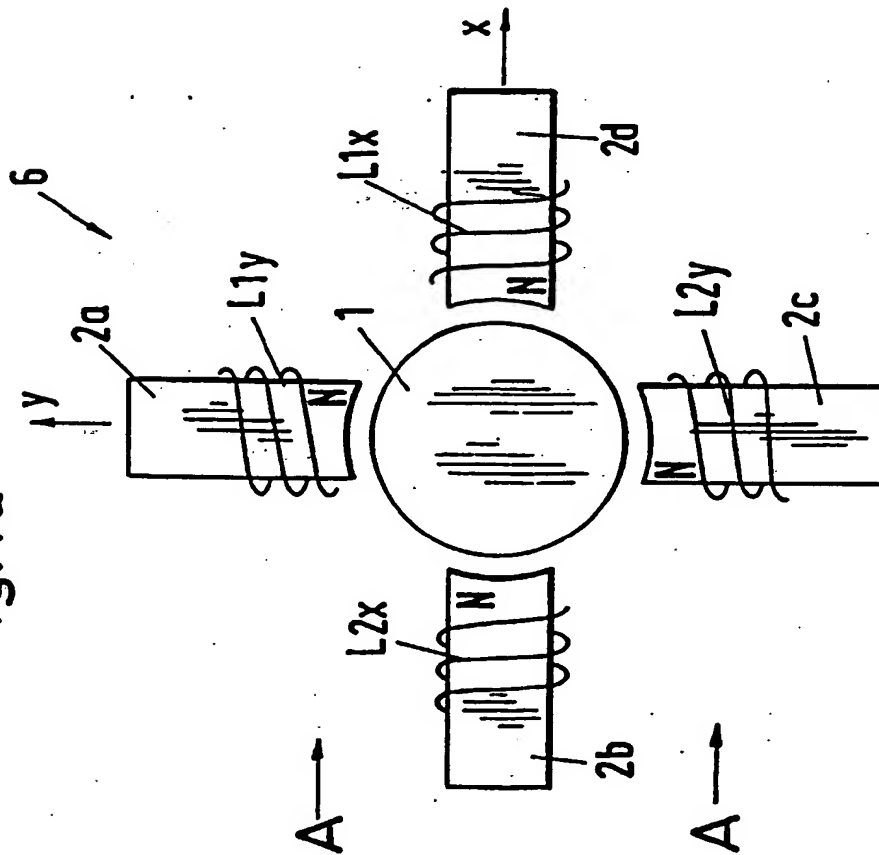
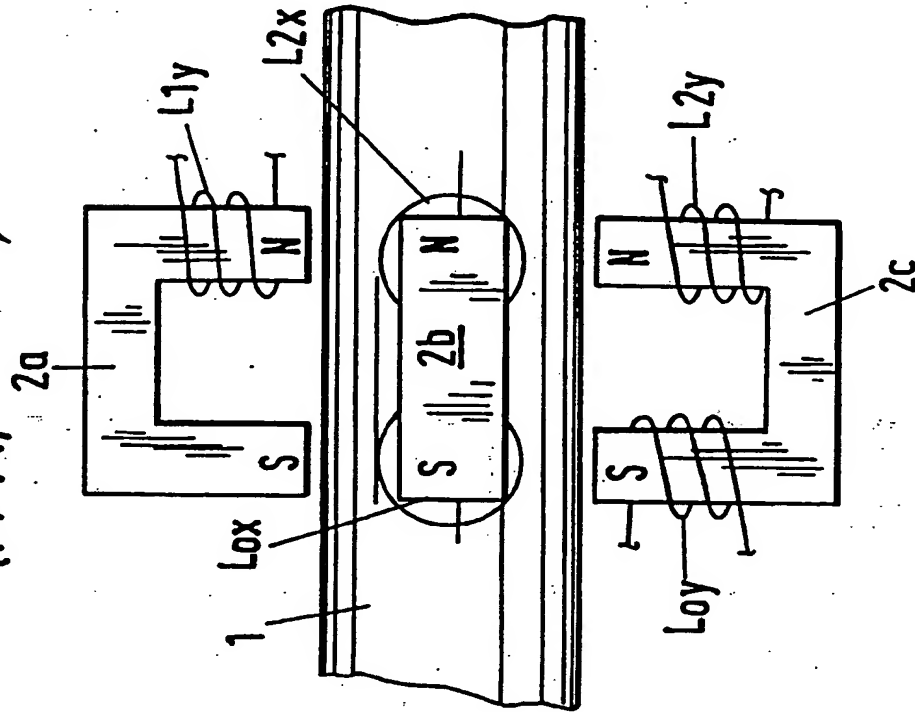
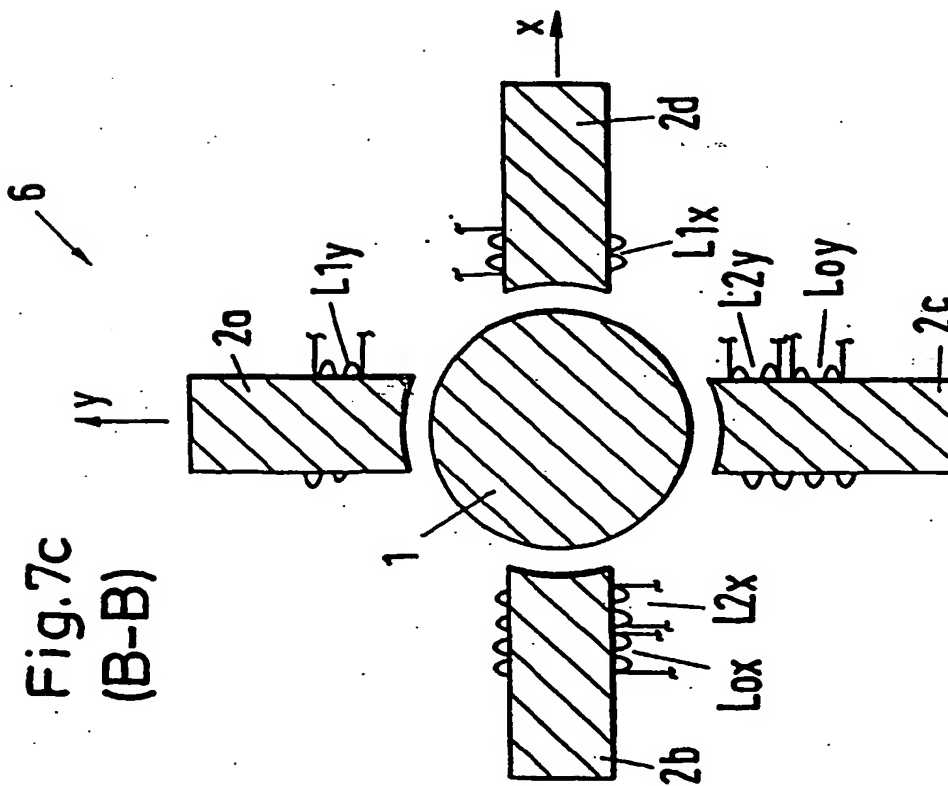
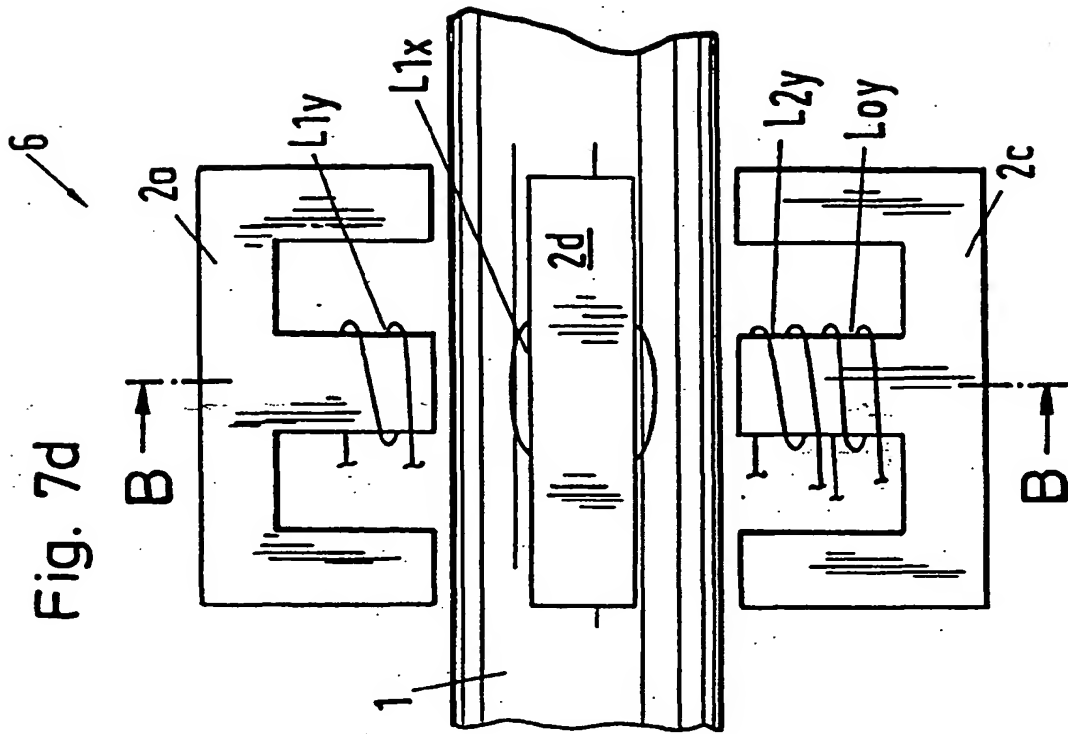
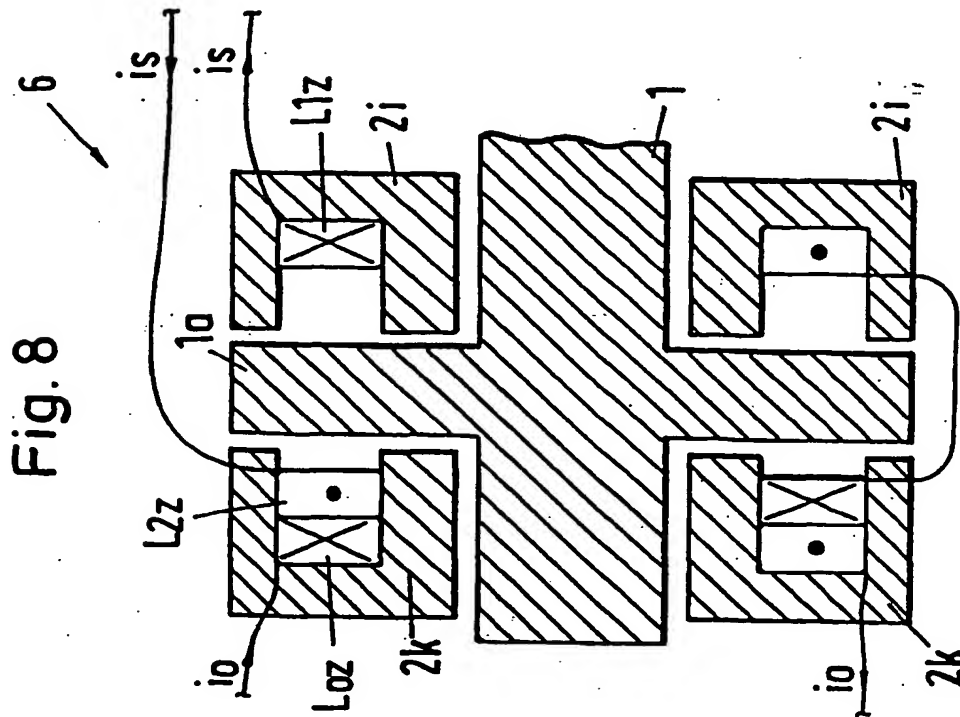
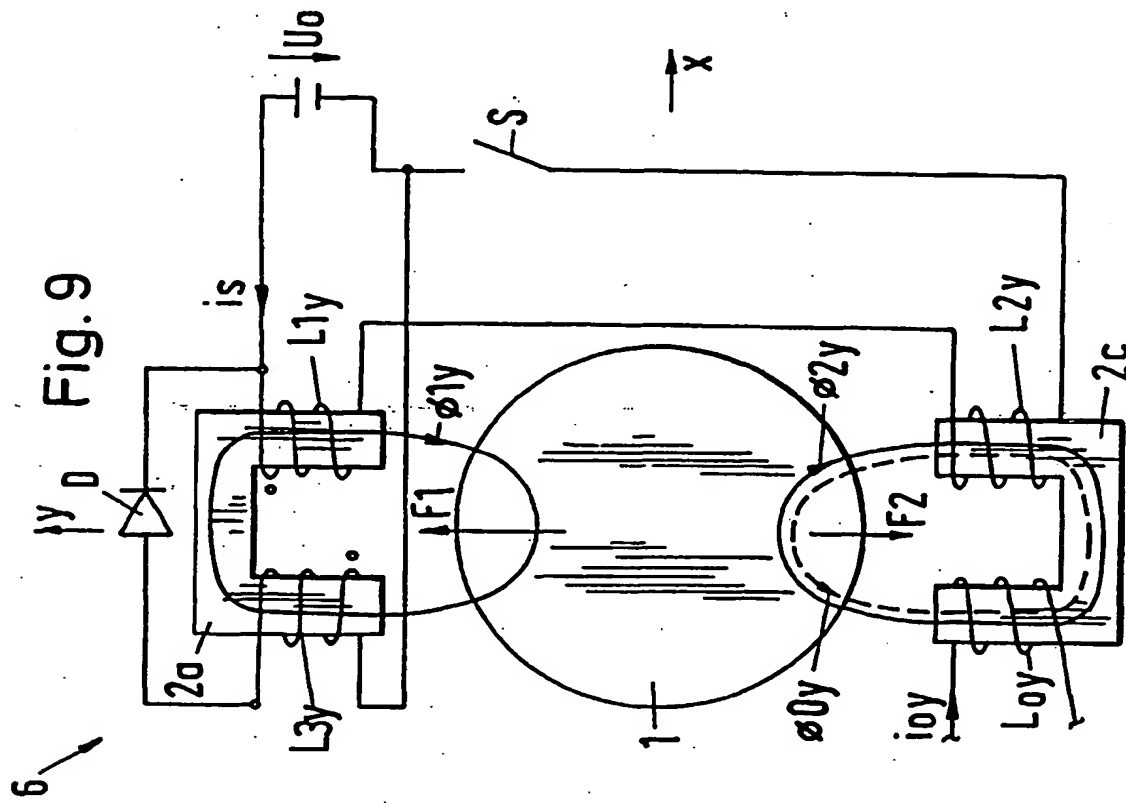


Fig. 7b  
(A-A)









Europäisches  
Patentamt

# EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 96 81 0668

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)
X	US 5 256 637 A (RAO) * das ganze Dokument *	1,2,4-7	F16C39/06
X	EP 0 364 993 A (EBARA ET AL.)	1	
Y	* Spalte 3, Zeile 20 - Spalte 4, Zeile 33 * * Spalte 5, Zeile 49 - Spalte 10, Zeile 24; Abbildungen 1-20 *	2-9	
Y	US 5 319 273 A (HOCKNEY ET AL.) * das ganze Dokument *	2-9	
X	US 5 179 308 A (MALSKY)	1	
Y	* Spalte 4, Zeile 22 - Zeile 47 * * Spalte 5, Zeile 23 - Spalte 7, Zeile 14; Abbildungen 1B,3A-4 *	4-6	
Y	DE 195 18 539 A (MECOS TRAXLER) * das ganze Dokument *	4-6	
A	DE 24 51 972 A (LICENTIA) * Seite 2, Zeile 18 - Seite 4, Zeile 13 * * Seite 7, Zeile 27 - Seite 9, Zeile 5; Abbildungen 1-4 *	1-9	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)
A	FR 2 322 294 A (PADANA) * Seite 5, Zeile 1 - Seite 9, Zeile 18 * * Seite 11, Zeile 35 - Seite 14, Zeile 20; Abbildungen 1-6 *	1-9	F16C H02K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchierter		Prüfer	
DEN HAAG		Geyer, J-L	
Abgeschlossen der Recherche		7.März 1997	
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X: von besonderer Bedeutung alleine betrachtet Y: von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A: technologischer Hintergrund O: nichtschriftliche Offenbarung P: Zwischenliteratur			
T: der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E: älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D: in der Anmeldung angeführtes Dokument L: aus anderen Gründen angeführtes Dokument &: Mitglied der gleichen Patentfamilie, überlappendes Dokument			

EPO FORM 150 (12/92) (P4000)